

*Е. В. Альбицкая, П. С. Альбицкий**

ПОВЫШЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

Среди наиболее важных характеристик, определяющих качество измерительных средств (ИС), особое место занимает метрологическая надежность (МН), значимым показателем которой является метрологический ресурс, оцениваемый временем выхода нормируемой метрологической характеристики за допустимые пределы. Расчет показателей МН и в том числе метрологического ресурса производится на основе прогнозирования состояния нормируемых метрологических характеристик на область значений времени предстоящей эксплуатации.

В основу метода определения показателей МН электронных ИС положен аналитико-вероятностный подход, базирующийся на математическом моделировании нестационарных случайных процессов изменения во времени метрологических характеристик измерительных средств [1]. Наиболее ответственным этапом использования этого метода является математическое моделирование исследуемых средств. Такие модели строятся на основе структурной и принципиальной схем ИС с привлечением теории графов, современных методов расчета электронных цепей, теоретических основ электротехники.

Для изучения метрологических свойств ИС необходимо иметь аналитические выражения для исследуемых метрологических характеристик. Для оценки состояния метрологических характеристик ИС математическая модель метрологической характеристики ИС представляет функциональную зависимость исследуемой метрологической характеристики от входного сигнала, параметров комплектующих элементов и условий эксплуатации.

При рассмотрении достаточно распространенного частного случая постоянства условий эксплуатации математическая модель ИС может быть определена зависимостью исследуемой характеристики ИС от параметров комплектующих элементов и входного сигнала, причем изменение во времени метрологической характеристики ИС обусловлено, прежде всего, временными изменениями параметров элементной базы

$$S(t) = F[x, \bar{\xi}(t)], \quad (1)$$

где x – значение входного сигнала; $\bar{\xi}(t)$ – параметры комплектующих элементов.

Состояние метрологической характеристики ИС в различных временных сечениях определяется по данным об изменении параметров элементной базы с применением статистического моделирования.

Одной из важных задач, возникающих при проектировании ИС с фиксированным уровнем МН, является задача оптимального выбора параметров комплектующих элементов проектируемого ИС, обеспечивающих заданную (максимальную) МН.

Задача обеспечения максимальной МН может быть сформулирована в виде задачи отыскания максимального метрологического ресурса:

$$t_p^* = \max_{i=1, \dots, n} \{ t_{pi} \}, \text{ при } \bar{S}(t, \bar{\varphi}) = \text{var}, \bar{\varphi} = \text{const}, \bar{y}(t) \in A, \quad (2)$$

где $\bar{S} = \{S_1, S_2, \dots, S_p\}$ – совокупность метрологических характеристик ИС; $\bar{\varphi}$ – вектор внешних возмущающих воздействий (условий эксплуатации); $\bar{y}(t)$ – совокупность выходных характеристик ИС; A – область работоспособности.

Соответственно, задача обеспечения требуемого уровня МН будет рассматриваться в виде задачи обеспечения требуемого метрологического ресурса $t_{\text{зад}}$ исследуемого ИС при заданном уровне значимости g :

$$P\{t_p - t_{\text{зад}} \geq 0\} \geq 1 - g, \text{ при } \bar{S}(t, \bar{\varphi}) = \text{var}, \bar{\varphi} = \text{const}, \bar{y}(t) \in A. \quad (3)$$

В качестве методов решения задачи (2) или (3) могут быть использованы методы параметрической оптимизации, позволяющие определять значения параметров, входящих в схему элементов, при которых достигаются заданные или экстремальные значения целевой функции. Для электрических схем целесообразно применять методы параметрической оптимизации нулевого порядка, к которым относятся: метод покоординатного спуска (Гаусса–Зайделя), метод конфигураций, метод Розенброка, метод случайного поиска, метод сопряженных направлений Пауэлла (параллельных касательных) [2].

Метод покоординатного спуска заключается в поочередном изменении одной переменной, тогда как другие переменные остаются постоянными до тех пор, пока не будет достигнут минимум (экстремум

* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. Т.И. Чернышовой.

исследуемой функции). Этот метод применим для функций, где взаимодействия между переменными несущественны.

Метод Розенброка заключается в повороте координатных осей за счет изменения переменных до тех пор, пока направление одной из них не совпадет с направлением оврагов исследуемой функции.

Для нахождения локального экстремума часто используют и методы случайного поиска. Эти методы сочетают в себе случайность при выборе направления поиска с прогнозированием поведения функции на основе проведенных ее вычислений.

Метод сопряженных направлений Пауэлла (параллельных касательных) основан на нахождении двух касательных к кривой, характеризующей исследуемую функцию, и проведении через найденные точки касания прямой, вдоль которой производится оптимизация.

Наиболее легко реализуемым при автоматизации оптимального выбора параметров комплектующих элементов оказался метод конфигураций.

Алгоритм метода конфигураций состоит из следующих операций. Прежде всего, задается начальная точка, а также начальное приращение. Чтобы начать пробные шаги, следует вычислить значение функции в начальной точке. Затем в циклическом порядке изменяется каждая переменная (каждый раз только одна) на выбранные значения приращений, пока все параметры не будут таким образом изменены.

Удачное изменение переменных в пробном поиске (т.е. те изменения переменных, которые улучшили функцию) определяют вектор, указывающий локальное направление минимизации, которое может быть удачным. Серия увеличивающихся шагов, или рабочий поиск, проводится вдоль этого вектора до тех пор, пока функция улучшается при каждом таком шаге.

Применение выбранного метода рассмотрено при решении задачи повышения МН аналоговых блоков, входящих в измерительные каналы электронных средств теплофизических измерений: усилителя постоянного тока (УПТ) и аналого-импульсного преобразователя (АИП).

В частности, для АИП математическая модель нормируемой метрологической характеристики, которой является основная относительная погрешность δ , имеет вид:

$$\begin{cases} \delta(t) = \frac{f(t) - f_{\text{ном}}}{f_{\text{ном}}} \%, \\ f(t) = \frac{3U_{\text{вх}}}{U_{\text{п}} C_1 R_2}, \end{cases} \quad (4)$$

где $f(t)$ – частота выходного сигнала; $f_{\text{ном}}$ – номинальное значение частоты выходного сигнала; $U_{\text{вх}}$ – входное напряжение; $U_{\text{п}}$ – напряжение питания; C_1 , R_2 – параметры комплектующих элементов.

Результаты проведенного прогнозирования основной относительной погрешности при априорной информации о характеристиках составляющей блок элементной базы позволяют определить метрологический ресурс, равный 37377 ч. при доверительной вероятности $P = 0,9973$.

Решение задачи (3) выбранным методом показало необходимость замены элемента номиналом $R_2 = 5,6$ кОм на два последовательно соединенных резистора с номиналами $R_2 = 4,7$ кОм, $R_3 = 1$ кОм.

Прогнозирование основной относительной погрешности после параметрической оптимизации позволило оценить метрологический ресурс, равный 45 340 часов при доверительной вероятности $P = 0,9973$. Таким образом, в результате решения поставленной выше задачи метрологический ресурс увеличился на 21 %.

Аналогичным образом проведенное решение задачи (2) для УПТ дает возможность увеличения

метрологического ресурса на 15 % при введении в схему блока элементов рассчитанных номиналов.

Таким образом, применение разработанного алгоритма позволяет эффективно решать задачу повышения МН проектируемых электронных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Мищенко С.В., Цветков Э.И., Чернышова Т.И. Метрологическая надежность измерительных средств. М.: Машиностроение-1, 2001. 96 с.

2 Автоматизация схмотехнического проектирования: Учеб. пособие для вузов / В.Н. Ильин, В.Т.

Фролкин, А.И. Бутко и др.; Под ред. В.Н. Ильина. М.: Радио и связь, 1987.